

철도 환승 연결로에서의 여객 유동 해석

남성원
한국철도기술연구원

Passenger Flow Analysis at Transit Connecting Path

Seongwon Nam
Korea Railroad Research Institute

요약 군중 유동은 대도시의 철도 환승역, 터미널, 복합 다중 건물, 경기장 등에서 흔히 볼 수 있으며, 이러한 시설물에서의 이용객들의 원활한 흐름 뿐만아니라 안전 확보측면에서도 중요한 요소이다. 본 연구에서는 새로운 군중 유동 해석법을 개발하여 철도 환승 연결로 모델에 대하여 적용하였다. 해석법에서는 출구의 포텐셜 값을 가장 작은 값으로 입력하고, 주변 격자들의 포텐셜 값은 점진적으로 증가시켜서 전체적인 포텐셜 지도를 구성한다. 포텐셜 값이 큰 격자에서 작은 격자로 이동하는 방향 벡터를 구하여 이를 따르는 유적선을 구한다. 이 유적선이 여객 유동의 기본 경로가 된다. 해석 대상의 모든 모델에서, 보행자들은 처음 예측된 최단 거리 경로로 이동하지 않고, 시시각각의 상황에 따라 변경된 대체 경로를 이용하여 이동하였다. 양 방향의 보행자가 서로 마주치는 병목 구역에서도 진입 시차를 두어 분산시키면 보행이 훨씬 더 원활하게 되었다. 이상의 해석 결과로부터, 철도역의 하드웨어적 개량 공사를 하지 않고, 여객 유동 분석과 같은 소프트웨어적 해석으로도 혼잡 완화 방안을 찾을 수 있음을 보여준다.

Abstract Crowd flows occur in metropolitan railway transit stations, terminals, multiple buildings, and stadiums and are important in ensuring the safety as well as smooth flow of pedestrians in these facilities. In this study, the author developed a new computational analysis method for crowd flow dynamics and applied it to models of transit connecting paths. Using the analysis method, the potential value of the exit was assigned the smallest value, and the potential value of the surrounding grids gradually increased to form the overall potential map. A pathline map was then constructed by determining the direction vector from the grid with large potential value to the grid and small potential. These pathlines indicate basic routes of passenger flow. In all models of the analysis object, the pedestrians did not move to the first predicted shortest path but instead moved using alternative paths that changed depending on the situation. Even in bottlenecks in which pedestrians in both directions encountered each other, walking became much smoother if the entry time difference was dispersed. The results of the analysis show that a method for reducing congestion could be developed through software analysis such as passenger flow analysis without requiring hardware improvement work at the railway station.

Keywords : Passenger Flow, Crowd Flow Dynamics, Computational Analysis, Railway Station, Pathline

본 논문은 한국철도기술연구원 주요연구사업과제(PK2001C4)로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seongwon Nam(Korea Railroad Research Institute)

email: swnam@krrri.re.kr

Received July 6, 2020

Revised July 20, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

도시철도 지하철 환승역에서 서로 다른 방향의 여객들이 마주치는 환승 연결로는 여객 유동이 특히 혼잡한 구역 중 하나이다. 여기서 발생하는 군중 유동에 대한 효과적인 분석은 이용객들의 동선을 원활하게 하여 환승역에서의 쾌적성 및 편리성의 향상뿐만 아니라 전체적인 환승 시간 단축 효과도 거둘 수 있으며, 또한, 화재와 같은 재난 발생시에는, 여객들이 안전하게 피난하는데에도 중요한 요소로 작용한다.

일반적으로, 환승객들이 지하철역 구내의 출발지로부터 목적지까지 이동하는 경로를 선택하는 데에는 여러 가지 요소가 작용한다. 매일 출퇴근하며 이용하는 것처럼, 사전에 알고 있는 경로라면, 대부분의 여객들은 최단 경로를 선택하려고 한다. 이에 비하여, 이용객들에게 익숙하지 않은 낯선 경로라면, 철도역 구내에 설치된 여러 가지 표시, 공간 구조, 크기 및 조명 등등의 외부 환경적 요인도 경로 선택에 주요하게 작용한다. 또한, 연령이나 건강 상태에 따라 빠른 보행과 느린 보행이 되기도 하고, 심리 상태에 따라 직진성도 작용한다[1-3]. 특히, 도시철도 환승역의 연결 통로의 경우, 여객들이 서로 반대 방향으로 마주치므로, 양쪽 방향에서 오는 이용객들의 교차 보행 유동이 발생하는 전형적인 모델이다.

군중 유동을 해석하기 위하여 다양한 방법들이 제안되었으며, 해석법은 크게 두 가지 부류인 continuous model[4-6]과 discrete model[7-11]로 분류할 수 있다. Nam은 입자 유동 현상과 군중 유동 현상의 많은 부분에서 서로 상사점을 가지고 있는 것에 착안하여 Potential-Pathline 개념을 이용하여 새로운 군중 유동 해석법인 P*FLOW를 개발하였다[9]. 본 연구에서는 개발한 P*FLOW를 이용하여 다양한 철도 환승 연결로 모델에서의 양방향 여객 교차 현상에 대한 군중 유동을 전산 해석하였다.

2. P*FLOW의 해석 방법

군중 유동 역학은 교통, 건축, 인간공학 분야에서 종종 연구되고 있는 주제이지만, 미세 입자를 함유한 유동과 물리적으로 유사한 점이 많으며, 두 현상간에는 많은 부분의 상사성이 있다. Table 1에 입자 유동과 군중 유동간의 항목별 비교를 나타내었다. 각각의 항목별로 비교하면, 유동장에 있는 입자를 유동시키는 것은 주변 유체가

지만, 군중 유동에서는 목표를 지향하는 이동 방향 벡터이며, 움직이는 주체는 각각 개별 입자와 개별 보행자이다. 입자 유동의 경우, 밀도는 체적분율로 나타내지만 군중 유동에서는 인구 밀도로 나타낸다.

Table 1. Similarity between two phenomena

Item	Particle flow	Crowd flow
Carrier	Fluid	Direction vector
Mover	Particle	People
Density	Volume fraction	Population density
Velocity	Particle speed	Walking speed
Governing equation	Equation of motion	Equation of position
Decision	Don't	Do

시시각각 변하는 유동장 내의 입자의 위치는 입자의 운동 방정식으로 구하지만, 군중 유동에서는 개별 보행자의 위치 방정식으로 구할 수 있다. 이처럼 두 유동 현상 사이에는 많은 점이 유사하지만, 한 가지 다른 점은, 입자들은 방향이나 속도를 선택하지 않지만, 군중 유동에서는 개개인이 각 시각 마다의 상황에 따라 보행 속도와 이동 방향을 선택한다는 점이다. 보행자가 경로를 찾을 때에 영향을 끼치는 주요 요소들을 Fig. 1에 표시하였다. 어떤 공간에서 길을 찾을 때는 다양한 환경 인지 정보와 자신의 경험을 통해 찾아간다. 환경 인지 정보로는 명암의 차이, 색채, 랜드마크, 통로의 크기, 종횡 패턴, 표시 등등이 있으며, 주로 외적 환경 요소들이다. 이에 비하여 경로를 결정하고 이동하는 보행자 개개인의 본질적 신체적 요소 중에서 대표적인 것으로는 개인의 보행 속도, 시야각, 직진성향, 우측통행 여부 등이 있다. 특히, 대도시의 도시 철도 환승역은 승객 유동이 과밀한 곳 중의 하나이며, 일반적으로 출퇴근 혼잡 시간의 도시 철도 환승역을 이용하는 승객들은 외적 환경 요인들보

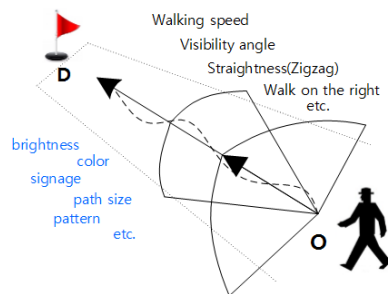


Fig. 1. Personal intrinsic factors for way-finding

다는 자신이 이용해 본 경험과 개개인의 신체적 본질적 특성에 따라 이동하려는 경향이 있다. 즉, 출발지부터 목적지까지 얼마나 빨리 이동하는가는 보행 속도에 의존할 것이며, 다양한 대체 경로나 장애물을 회피하는 데는 시야가 넓거나 좁음에 따라 선택폭이 달라지며, 얼마나 곧바로 이동하는가 여부는 직진 성향이, 그리고, 마주 오는 보행자를 만났을 때 우측 통행을 하는지 여부가 경로 선택에 영향을 준다. 군중 유동 해석을 위하여 개발된 포텐셜-유적선법의 기본적인 개념은 참고 문헌[9]에 설명되어 있으며, 여기에서는 대체 경로를 찾는 알고리즘을 간략히 설명한다. 포텐셜-유적선법에 따라 처음 구한 Pathline은 어디까지나 이상적인 상황에서의 최단거리 Pathline이며, 실제로는 이동 중에도 다양한 방해 요소가 생길 수 있다. 예를 들면, 선행 보행자의 속도가 느리다면, 뒤따라오는 빠른 보행자의 진로에는 방해가 되므로, 빠른 보행자는 선행의 느린 보행자를 추월하기 위하여 돌아가는 대체 경로를 선택할 것이다. 대체 경로를 찾는 이산 개념을 Fig. 2(a)에 나타내었다. Fig. 2(b)처럼 대체 경로를 찾는 것은 격자 기반으로 한다. 출발점 O에 있던 보행자가 원래의 경로인 D 격자로 이동하려고 할 때, 격자 F에 만약 다른 보행자가 있다면,

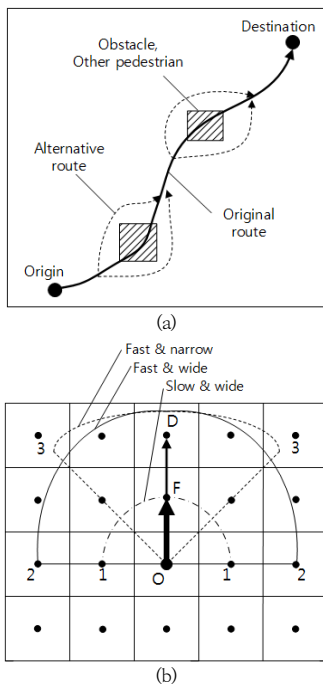


Fig. 2. Alternative Way-finding
 (a) Concept of Alternative route
 (b) Alternative route on Grid-base

D 격자 이외의 주변 격자를 찾는데, 보행자가 빠르고 시야각이 좁은 사람이라면 점선으로 이루어진 3-D-3의 범위에서 찾으며, 빠르고 시야각이 넓은 사람이라면 실선으로 이루어진 2-D-2에서, 느리고 시야각이 넓은 사람이라면

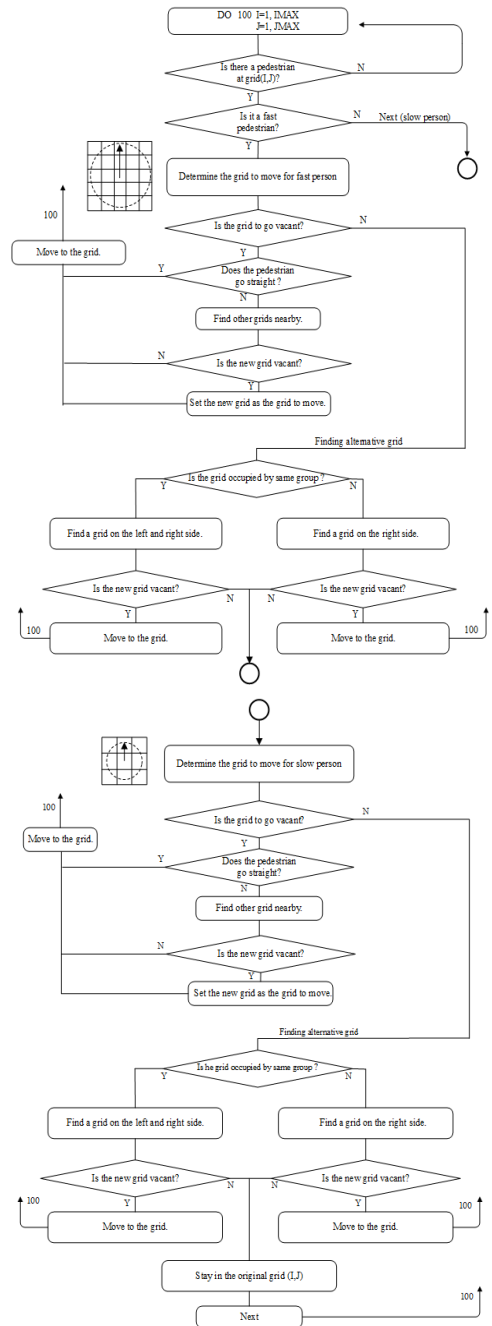


Fig. 3. Flowchart for way-finding

일점 쇄선으로 이루어진 1-F-1 범위에 있는 격자에서 찾는 것으로 이산화할 수 있다. 만약, 마주 오는 보행자와 만났을 때 우측 통행을 한다고 하면, 원래 경로의 우측에 있는 격자에서만 대체 격자를 찾는 것으로 가정할 수 있다.

위의 같은 절차에 따라 경로를 찾는 알고리즘 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다. 계산 영역 내의 고려 대상인 가로 세로 좌표인 (I,J) 주소에 보행자가 있는지 여부와 빠른 보행자인지 여부를 판단하고, 빠른 보행자라면 큰 원에 걸쳐있는 16개의 격자 중에서 Δt 시간 후 이동할 격자를 찾는다. 만약, 직진 성향이 큰 보행자라면 그대로 이동하지만, 보행시 지그재그 성향이 있다면, 해당 방향의 주변에 있는 대체 격자를 찾는다. 만약, 이동할 격자에 이미 다른 보행자가 있다면, 주변의 다른 격자를 찾으며, 이때에도 그 보행자가 마주 오는 대향류의 보행자라면 우측 통행을 하여 우측에 있는 격자에서 찾고, 같은 방향의 보행자라면, 좌우 양측의 격자중에서 빈 격자를 찾는다. 위의 과정에서도 빈 격자를 찾지 못하면, 속도를 줄여서 느린 보행을 하는 프로세스로 전환한다. 이 경우에는 이동할 격자를 찾는 범위가 줄어들어 흐름도에서 보는 바와 같이 작은 원내에 있는 8개의 격자 중에서 찾는다. 이 경우에도, 이동할 격자가 비어있는지, 직진 성향이 있는지, 마주치는 보행자와의 우측 통행 여부에 따라 대체 격자를 선택한다.

3. 해석 결과 및 분석

Potential pathline 방법을 이용한 P*FLOW 프로그램의 유효성 및 성능은 기존의 해석 프로그램 및 타 연구 결과와의 비교에서 검증하였으며[9], 정량적 및 정성적으로 우수함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 철도 환승 연결로 모델에 대하여 해석하였으며, 그 결과에 대한 정량적 및 정성적인 분석을 하였다. Fig. 4의 해석 모델은 양 방향의 군중이 180°로 마주치는 모델이다. 통로폭은 8m이며, 각각의 보행자 그룹은 좌우측 입구에서 진입하여 직진 통로를 16m 이동하고, 좌회전하여 16m를 이동한 후, 다시 우회전하여 16m를 이동하여 출구로 나가는 모델로서, 각 방향에서 50명씩, 합계 100명의 보행자가 평균속도 1m/s~1.4m/s 로 보행한다. Fig. 4(b)는

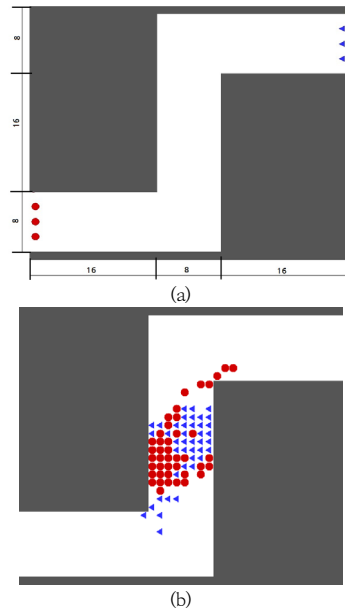


Fig. 4. Snapshot of Passenger flow (180° count flow)
(a) Calculation model (b) Snapshot of the simulation

스냅샷으로, 좌측 입구에서 우측으로 이동하는 ●그룹과 우측 입구에서 좌측으로 이동하는 ◀그룹은 서로 마주치는 경로 중앙에서 뒤엉켜 있음을 알 수 있다. 이는 각각의 보행 그룹이 최단거리 경로를 선택할 경우, 서로 마주치는 경로 중앙에서 동선이 서로 중첩되기 때문이다. Fig. 5에 Potential Pathline에 기반한 원래의 경로와 보행시 환경 조건에 따라 변경된 경로를 비교하였다. 원래 경로를 보면, 좌측 하단 입구에서 유입된 경우, 최단거리를 따라 우측 출구로 나가는 것으로 되어 있지만, 실제로 변경된 경로를 보면, 보행시간 보행 속도의 차이, 시야 각도, 직진 성향 등으로 인하여 예상된 최단 경로를 따라 이동하지 않음을 알 수 있다. 기존의 많은 상용 프로그램과 거시적으로 교통 분석에서는, 최단거리를 이용한다는 가정하에 통행량을 예측하기도 하는데, 본 해석 결과를 보면, 실제와는 다름을 알 수 있다. Fig. 6에 원래 경로와 비교하였을 때, 실제 유동에서는 어느 정도 시간 차이가 발생하였는지에 대한 것을 시야 각도별로 비교하여 표시하였다. 여기서, 시야 각도가 180°는 Fig. 2에서 보듯이 진행 방향에 대하여 좌우 90°인 2-D-2인 원호내에 있는 격자에서 이동할 격자를 찾는다. 원래 경로로부터 벗어난 정도가 클수록 최단거리 경로로부터 많이 벗어났다는 것이며, 그 차이가 클수록 많이 우회하여 보행하였다는 것을 의미한다. 그림에서 보듯이, 시야각이 제일 작은 90°와 제일 큰 180°에서는 시간 편차가 컸으며, 시야각이

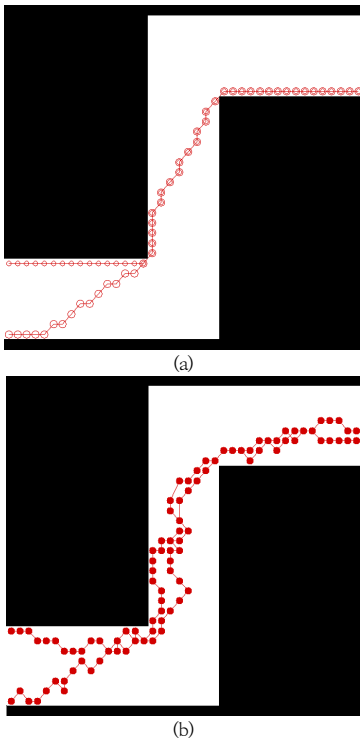


Fig. 5. Comparison of Path
(a) Shortest path (b) Actually used path

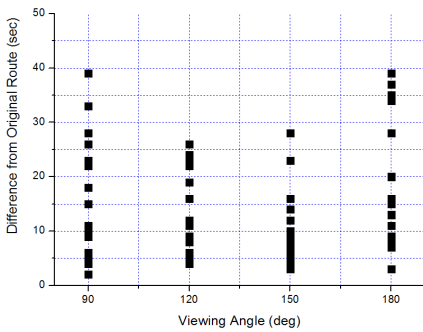


Fig. 6. Difference from original route

120° 및 150°에서는 편차가 비교적 작았다. 시야각이 비교적 작은 90°의 경우는 대체 경로의 선택의 폭이 작아서 마주 오는 대향류 보행자와 엉키는 시간이 길어졌으며, 시야각이 큰 180°의 경우는 대향 보행자와 만났을 때 좌우측 격자로 이동하는 경우가 많아서 상대적으로 전체적인 경로가 길어지고, 그 결과 시간이 길어진 것으로 사료된다. 이 결과로부터 양방향 대향류의 보행시에는 시야각이 90° 및 180° 보다도, 중간인 120° 및 150°의 시야각을 가진 경우가 최단 거리로부터 벗어난 정도가 상대적으로 작았음을 알 수 있다. 두 번째 해석 모델은

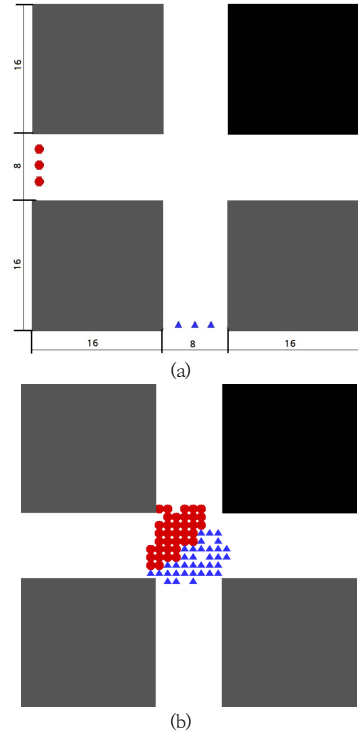


Fig. 7. Snapshot of Passenger flow (90° count flow)
(a) Calculation model (b) Snapshot of the simulation

양 방향의 군중이 90°로 마주치는 모델이다. 통로폭은 8m이며, 직선로를 40m 이동하는 모델로서, 각 방향에서 40명씩, 합계 80명의 보행자가 평균속도 1m/s~1.4m/s로 이동한다. Fig. 7(b)는 중간의 교차점에서 만났을 때의 스냅샷이며, ●보행자 그룹은 좌측 입구에서 우측으로 이동하고, ▲보행자 그룹은 아래쪽 입구에서 위로 이동한다. 양측 보행자들이 마주치는 중앙 교차로 근처에서 혼잡한 양상을 보이며, ●보행자 그룹은 위쪽으로, ▲보행자 그룹은 오른쪽으로 각각 밀리는 현상이 나타난다. 양측의 보행자 그룹이 만나는 교차로 영역에서는 서로간의 이동 동선이 충돌하는 곳이므로, 각각 인구 밀도 낮은 바깥쪽 영역으로 밀리면서 형성되는 패턴이다. 즉, 아래쪽에서 위로 이동하는 ▲ 보행자 그룹은 중앙의 교차점에서 ● 보행자 그룹과 부딪친 후 원래 경로보다 우측으로 밀리며, ● 보행자 그룹은 ▲ 보행자 그룹과 부딪친 후 원래 경로보다 위쪽으로 밀리는 경향을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 P*FLOW를 이용하여 철도 환승 연결

로 모델에서의 여객 유동을 해석하였다. 모든 모델에서, 대부분의 보행자들은 예측된 최단거리 경로로 이동하지 않고, 각 상황에 따라 변경된 대체 경로를 이용하여 이동하였다. 양쪽 군중이 마주치는 혼잡 상황에서 원래의 최단거리 경로가 항상 비어있지 않으므로, 대체 경로를 찾아 우회하였음을 시사한다. 시야각이 작은 경우, 대체 경로 선택 폭이 작아서 대향류 보행자와 만나는 시간이 길어졌으며, 시야각이 큰 경우, 대향 보행자와 만났을 때 좌우측 격자로 이동하는 경우가 많아서 전체적인 경로가 길어져 소요 시간도 길어졌다. 두 보행자 그룹이 90°로 만나는 모델에서는, 양방향 보행자가 집중되는 병목 지역이라도, 서로 간의 진입 시차를 두면, 보행이 훨씬 더 원활하게 됨을 알 수 있다. 혼잡도가 심한 철도 환승역의 경우, 차량의 운행 시격을 조정하면, 양방향 군중의 진입을 분산시킬 수 있으므로 혼잡도 저감에 유효한 방안이다. 혼잡한 도시철도 환승역의 환경 개선을 위하여 대규모 개량 공사를 하지 않고, 차량 운영 패턴을 바꾸는 소프트웨어적 방안으로도 혼잡도를 완화시킬 수 있음을 보여준다.

References

- [1] R. L. Hughes, "The flow of human crowds", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.35, pp.169-182, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161136>
- [2] S. P. Hoogendoorn, P. H. L. Bovy, "Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models", *Transportation Research Part B*, Vol. 38, pp.169-190, 2004. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615\(03\)00007-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-2615(03)00007-9)
- [3] M. Moussaid, D. Helbing, G. Theraulaz, "How Simple Rules determine Pedestrian Behavior and Crowd Disasters", *PNAS*, Vol.108, No. 17, pp.6884-6888, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1016507108>
- [4] D. Helbing, P. Molnar, "Social force model for pedestrian dynamics", *Physical Review E*, Vol. 51, pp.4282-4286, 1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/physRevE.51.4282>
- [5] W. Daamen, *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Netherlands., pp.129-180. 2004
- [6] R. Lohner, "On the modelling of pedestrian motion," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, pp.366-382. 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apm.2009.04.017>
- [7] K. Nagal, M. Schreckenber, "A cellular automation model for freeway traffic," *Journal of Physics*, Vol. 2,

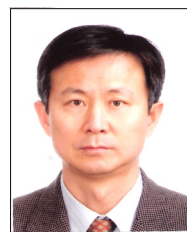
No. 12, pp.2221-2229. 1992.

DOI: <http://doi.org/10.1051/jp1:1992277>

- [8] V. Blue, J. Adler, "Cellular automata micro simulation for modelling bi-directional pedestrian walkways," *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp.293-312. 2001. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00052-1](http://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00052-1)
- [9] S. W. Nam, "Development of Potential Pathline Method for Railway Passenger Flow Analysis," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 21, No. 8, pp.830-837. 2018. DOI: <http://doi.org/10.7782/JKSR.2018.21.8.830>
- [10] G. Antonini, M. Bierlaire, M. Weber, "Discrete choice models of pedestrian walking behavior," *Transportation Research Part B*, Vol. 40, pp.667-687. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2005.09.006>
- [11] R. Guo, S. Wong, H. Huang, P. Zhang, W. Lam, "A Microscopic Pedestrian-simulation Model and Its Application to Intersecting Flows," *Physica A*, Vol. 389, pp.515-526. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2009.10.008>

남 성 원(Seong-Won Nam)

[정회원]



- 1990년 2월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (석사)
- 1994년 3월 : 일본 東北大 대학원 기계공학과 (박사)
- 1994년 4월 ~ 1995년 2월 : 일본 이와테대학 기계공학과 문부교관
- 1995년 3월 ~ 1996년 7월 : 한국 과학기술정보연구원 선임연구원
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

기계, 4차산업